

文章编号:1671-8879(2017)05-0023-08

水性环氧树脂改性乳化沥青微表处性能

季 节^{1,2},刘禄厚^{1,2},索 智^{1,2},许 鹰²,杨 松³,徐世法^{1,2}

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044; 3. 中咨公路养护检测技术有限公司,北京 100089)

摘 要:为评价水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的性能,采用先乳化后改性的方法制备水性环氧树脂改性乳化沥青,利用三因素三水平正交试验确定最佳油水比、乳化剂掺量和水性环氧树脂掺量,并以其作为微表处胶结料。通过 1 h 湿轮磨耗试验(WTAT)和负荷轮黏附砂试验(LWT)测定 5 组不同油石比微表处的磨耗值和黏附砂量,根据磨耗值或黏附砂量与油石比曲线交点确定微表处最佳油石比。采用 6 d WTAT、摆值试验和渗水试验分别评价微表处的抗水损坏、抗滑性能和防水性能,通过轮辙变形试验判定水性环氧树脂改性乳化沥青微表处可用于车辙填补,并利用车辙填补试验和单面车辙试验评价微表处的抗车辙性能。研究表明:水性环氧树脂改性乳化沥青最佳油水比为 65:35,乳化剂掺量(质量分数,下同)为 1.4%,水性环氧树脂掺量为 4%,微表处最佳油石比在 6.7%附近;微表处抗水损坏性能满足磨耗值不大于 800 g/m²的技术要求,抗滑性能满足摆值不小于 70 BPN 的技术要求,且其高出技术要求,能为行车提供较好的摩擦力;经碾压养生后的微表处渗水系数为 0,防水效果好;同时,微表处的宽度变形率和车辙深度率较小,可用于路面早期压密性车辙填补(不宜用于结构性车辙填补),经过微表处单面后能显著提高路面的高温抗变形能力,有效恢复路面平整度。

关键词:道路工程;水性环氧树脂;改性乳化沥青;微表处;性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Performances of micro-surfacing with waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt

Ji Jie^{1,2}, LIU Lu-hou^{1,2}, SUO Zhi^{1,2}, XU Ying², YANG Song³, XU Shi-fa^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. CHECC Highway Maintenance and Test Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: In order to evaluate the performances of micro-surfacing with waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt, waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt was prepared by the method of emulsification first and then modification. The optimum oil-water ratio, emulsifier content and waterborne epoxy resin content were determined through orthogonal test with three factors and three levels. The 1 h WTAT (wet track abrasion test) and LWT (load wheel test)

收稿日期:2017-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51478028);北京市教育委员会市属高校创新能力提升计划项目(PXM2015-014210-000003);北京市百千万人才工程项目

作者简介:季 节(1972-),女,河南信阳人,教授,工学博士,E-mail:jijie@bucea.edu.cn。

were conducted on micro-surfacing to measure abrasion values and adhesion sand contents of five groups of different asphalt-aggregate ratios, and the optimum asphalt-aggregate ratio of micro-surfacing was determined by the intersection point which was from curves of abrasion values or adhesion sand contents and the asphalt-aggregate ratios. The 6 h WTAT, the pendulum value test and the seepage test were conducted on micro-surfacing to evaluate the resistance to water damage, skid resistance performance and waterproofness, respectively. Micro-surfacing of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt could be used to fill rutting by the test of wheel rutting deformation, and the rutting resistance of the micro-surfacing was evaluated by the rutting resistance test and overlay rutting test. The results show that the optimum oil-water ratio, emulsifier content and waterborne epoxy resin content of waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt are 65 : 35, 1.4 % and 4 % (mass fraction, the same below), respectively, and the optimum asphalt aggregate ratio of micro-surfacing is very close to 6.7%. Performance of resistance to water damage of micro-surfacing meets the technical requirements that the abrasion values are not more than 800 g/m², and the skid resistance performance of micro-surfacing also meets the current technical requirements that the pendulum number is no less than 70 BPN. And it is higher than the technical requirements, which can provide better friction for the traffic. The seepage coefficient of micro-surfacing is zero after rolling, which indicates that waterproof effect is good. Furthermore, the width deformation ratio and rutting depth ratio of micro-surfacing is very small, which can be used for filling the early compaction rutting (can not be used for filling the structural rutting). Micro-surfacing after overlay can significantly improve the high temperature deformation resistance of road and efficiently restore roughness of road. 16 tabs, 4 figs, 24 refs.

Key words: road engineering; waterborne epoxy resin; modified emulsified asphalt; micro-surfacing; performance

0 引言

随着中国公路由建设为主进入了“建养并举”的新阶段,路面维修养护技术,尤其是路面的预防养护技术需求十分迫切^[1]。微表处作为预防性养护的技术手段之一,可以有效地改善路面的使用性能,提高路面摩擦和防水性能,并具有常温施工速度快,对交通影响较小,能耗低等技术优势^[2-6]。Krummenauer 等采用干法将铬鞣皮革残留物分别按质量比 0.3%、0.5%、0.7% 掺入微表处中,发现 0.3% 铬鞣皮革残留物的掺入能使路面开裂最小化^[7]。Son 等发现随着养生时间的增加,聚合物改性乳化沥青微表处和稀浆封层的密实度与稳定度均显著增加,通过测试聚合物微表处和稀浆封层处理后路面的裂缝、车辙、粗糙度指数等,发现使用微表处后的路用性能提高了 53.3%~54.2%,使用稀浆封层后的路用性能提高了 21.6%~59.7%^[8-9]。Wu 利用图像法确定了微表处的最佳沥青用量,并且建议采用低温弯曲试验测得的乳化沥青用量作为微表处的最佳沥青用量,发现在斜坡的出入

口使用纤维微表处可以减少制动距离^[10]。Zhao 等发现在微表处中加入橡胶颗粒能够降低噪音和轻微改善路面性能,并且提出了吸声和减振理论^[11]。钟建超等研究了材料类型、级配组成及纤维掺入等对微表处路用性能的影响,认为微表处对提高路面摩擦和填补稳定性车辙的效果良好^[12-14]。黄志军等发现传统的 SBR 改性乳化沥青微表处黏结强度低、抗低温及疲劳开裂能力差,易出现松散、剥落、蜕皮等病害,耐久性差^[15]。孙晓立等通过模拟轮胎与路面间的作用对微表处进行了室内加速加载试验,发现改性乳化沥青的性质对微表处的耐久性影响较大^[16-17]。黎侃等对传统微表处材料添加适量聚丙烯单丝纤维,发现纤维的加入能有效改善微表处材料的黏附性和整体路用性能^[18]。

综上,国内外研究者对微表处或稀浆封层的研究基本都是针对其某方面的性能,并且采用的微表处胶结料多为传统的改性乳化沥青,而传统微表处胶结料具有黏度低、黏附性不足、高温性能差等技术缺陷,需添加纤维等外加剂进行二次改性^[19-20]。水性环氧树

脂是以环氧树脂微粒为分散相,以水为连续相的液相体系材料,可以在室温条件下及潮湿环境中固化,能很好地保留环氧树脂强度高和黏结力强的特点,用作微表处胶结料时,可有效弥补传统改性乳化沥青的技术缺陷。本文首先以水性环氧树脂作为乳化沥青改性剂,利用水性环氧树脂在乳化沥青中形成的三维网状结构,改善乳化沥青整体性能,开发水性环氧树脂改性乳化沥青。其次,以水性环氧树脂改性乳化沥青为胶结料,通过材料组成设计优化,配制微表处混合料,提高微表处的整体性能以及与原路面的黏结力,延长微表处的使用寿命。最后,对水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的防水性能、抗滑性能以及抗车辙性能等进行综合评价,为以后大面积推广水性环氧树脂改性乳化沥青微表处提供理论依据。

1 原材料特性

1.1 集料

粗集料采用玄武岩,细集料为石灰岩机制砂,根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[21]测试集料的各项性能,测试结果见表 1、表 2。集料的各项性能指标均满足《微表处和稀浆封层技术指南(2006)》^[22]的技术要求。

表 1 玄武岩性能
Tab. 1 Properties of basalt

试验方法	试验项目	实测值	技术标准 ^[22]
T 0304—2005	表观密度/(g·cm ⁻³)	2.711	≥2.60
T 0317—2005	洛杉矶磨耗损失/%	8.9	≤28
T 0304—2005	吸水率/%	0.5	≤2
T 0314—2000	坚固性/%	10	≤12
T 0616—2008	黏附性	5 级	>4 级

表 2 机制砂性能
Tab. 2 Properties of mechanism sand

试验方法	试验项目	实测值	技术标准 ^[22]
T 0328—2005	视密度/(g·cm ⁻³)	2.662	≥2.5
T 0314—2000	细集料坚固性/%	14	≥12
T 0334—2005	砂当量/%	73	≥65

1.2 填料

填料采用矿粉和水泥,其中矿粉为磨细的石灰岩粉,水泥采用普通硅酸盐 PO42.5 水泥。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)^[21]和《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2007)^[23]测试填料的性能,测试结果见表 3、表 4。

1.3 基质沥青

基质沥青采用韩国 SK-90 沥青,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测试 SK-90 沥青的各项性能,见表 5。

表 3 矿粉性能
Tab. 3 Properties of mineral powder

试验方法	试验项目	实测值	技术标准 ^[24]
T 0352—2000	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.763	≥2.50
T 0332—2005	含水量/%	0.15	≤1
T 0353—2000	亲水系数	0.65	<1
T 0354—2000	塑性指数	2.0	<4
目测法	外观	无团粒结块	无团粒结块

表 4 水泥性能
Tab. 4 Properties of cement

试验项目	烧失量/%	氧化镁/%	三氧化硫/%	细度/%	初凝时间/min	终凝时间/h	安定性
实测值	2.4	3.7	2.8	5.7	65	4.8	合格
技术标准 ^[23]	<3.0	<5.0	<3.5	<10	>45	<6.5	合格

表 5 SK-90 沥青性能
Tab. 5 Properties of SK-90 asphalt

试验方法		试验项目	实测值	技术标准 ^[24]
基质沥青	T 0604—2011	针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	81	80~100
	T 0606—2011	软化点/℃	51.8	≥45
	T 0605—2011	延度(10℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	51	≥45
	T 0620—2000	60℃动力黏度/(Pa·s)	218.4	≥160
旋转薄层膜加热试验后的残留物	T 0608—1993	质量变化/%	0.1	±0.8%
	T 0604—2011	针入度比(25℃,100 g,5 s)/%	61	≥57
	T 0605—2011	残留延度(10℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	8	≥6

1.4 乳化剂

乳化剂为某国产阳离子慢裂快凝型乳化剂,其性能见表 6。

表 6 乳化剂性能
Tab. 6 Properties of emulsifier

试验项目	活性物含量/%	pH 值	外观	气味
实测值	≥75	8~10	黑褐色黏稠液体	无刺激性气味

1.5 改性剂

改性剂采用水性环氧树脂及固化剂,为某国产水性环氧树脂 E51 及胺类固化剂,其性能见表 7。

表 7 水性环氧树脂及固化剂性能
Tab. 7 Properties of waterborne epoxy and curing agent

试验项目	水性环氧树脂	固化剂
外观	乳白色均匀液体	淡黄透明液体
固含量/%	≥58	≥50
密度/(g·cm ⁻³)	1.05~1.10	1.05~1.10
黏度/(Pa·s)	≤2	≤10
pH 值	6~8	8~10
环氧值	0.24~0.27	
活泼氢当量		300

2 试验结果与分析

2.1 水性环氧树脂改性乳化沥青性能

2.1.1 制备工艺

水性环氧树脂改性乳化沥青采用室内小型剪切设备自行生产,具体制备工艺如下:

- (1)将沥青加热至 130 ℃。
- (2)将乳化剂与水按照比例进行混合,并加热到 60 ℃。在加热过程中人工搅拌,保证乳化剂均匀溶解。
- (3)将剪切仪放入乳液中,打开剪切仪低速剪切,将 130 ℃的热沥青分 2 次缓慢加入乳液中。
- (4)将沥青和乳液混合溶液在 60 ℃下剪切 30 min。
- (5)依次加入环氧树脂 A 组分和 B 组分,继续在 60 ℃下低速剪切 5~10 min。
- (6)将水性环氧树脂改性乳化沥青冷却至室温(冷却降温过程中注意搅拌,避免结皮),贮存待用。

2.1.2 性能

以油水比、改性剂掺量、乳化剂掺量为控制因素,利用三因素三水平正交试验分析不同因素和水平对水性环氧树脂改性乳化沥青蒸发残留物的针入度、软化点、延度三大指标的影响,确定水性环氧树脂改性乳化沥青的最佳配比,见表 8。

表 8 改性乳化沥青正交试验方案及性能

Tab. 8 Orthogonal experimental scheme and properties of modified emulsified asphalts

试件 编号	油水 比/%	改性 剂掺 量/%	乳化 剂掺 量/%	蒸发残留物		
				针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/ 0.1 mm	软化 点/℃	延度(5 ℃, 5 cm·min ⁻¹)/ cm
1	60:40	4.0	1.2	50.0	54.78	9.7
2	60:40	6.0	1.4	48.5	55.47	10.8
3	60:40	8.0	1.6	41.5	56.87	8.0
4	65:35	4.0	1.4	57.4	57.06	12.3
5	65:35	6.0	1.6	53.4	51.41	8.3
6	65:35	8.0	1.2	42.8	56.37	6.5
7	70:30	4.0	1.6	56.4	52.12	8.9
8	70:30	6.0	1.2	50.0	54.38	7.6
9	70:30	8.0	1.4	43.0	53.95	6.8

从表 8 可以看出:编号 4 的水性环氧树脂改性乳化沥青蒸发残留物的高温性能(软化点)及低温性能(延度)最好。所以选择油水比为 65:35,改性剂掺量为 4.0%,乳化剂掺量为 1.4%的水性环氧树脂改性乳化沥青进行下一步微表处性能试验。

2.2 水性环氧树脂改性乳化沥青微表处性能评价

2.2.1 配合比设计

(1)级配选择

级配选为 MS-Ⅲ型,见表 9,其中外加剂中矿粉掺量为 8.5%,水泥掺量为 1.5%。

表 9 MS-Ⅲ型级配

Tab. 9 MS-Ⅲ gradation

筛孔孔径/mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率 /%	上限	100	90	70	50	34	25	18
	下限	100	70	42	28	19	12	7
	合成级配	100	80	68	39	26	18	10

(2)最佳油石比的确定

微表处的油石比是通过 1 h 湿轮磨耗试验(WTAT)及负荷轮黏附砂试验(LWT)共同确定,其中 1 h WTAT 的磨耗值用于确定微表处的最小油石比,LWT 的黏附砂量用于控制微表处的最大油石比。表 10 和图 1 为微表处的 1 h WTAT 及 LWT 试验结果。

表 10 不同油石比下微表处的 1 h WTAT 和 LWT 试验结果

Tab. 10 Results of 1 h WTAT and LWT of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

油石比/%	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	技术标准 ^[22]
磨耗值/(g·m ⁻²)	423	327	300	282	270	<540
黏附砂量/(g·m ⁻²)	335	362	395	426	453	<450

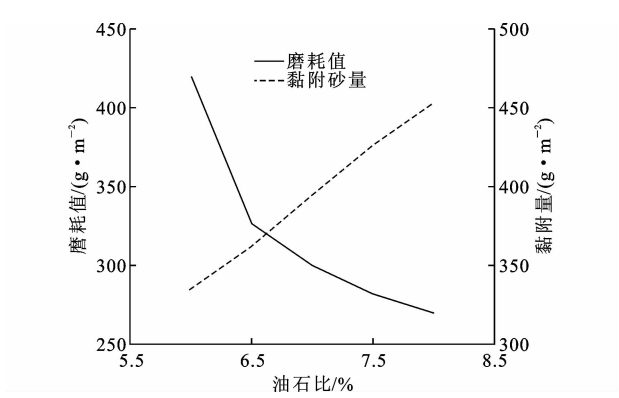


图 1 油石比确定

Fig. 1 Determination of optimum binder-aggregate ratios of micro-surfacing

根据表 10 和图 1 可知:微表处的最佳油石比在 6.7% 附近,由于在实际应用时要结合实际的交通、气温与降水等环境因素对最佳油石比进行修正,因此在后续试验中取理论最佳油石比的附近用量 6.5% 和 7.0% 的 2 个油石比,进行微表处的性能评价。

2.2.2 性能评价

2.2.2.1 抗水损坏能力

采用 6 d WTAT 的磨耗值来表征微表处的抗

水损坏能力,见表 11。从表 11 可以看出:

(1)油石比为 6.5%和 7.0%的水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的抗水损坏能力均满足规范要求。通过对 SK-90 沥青和水性环氧树脂改性乳化沥青进行 135 ℃黏度试验发现(其 135 ℃黏度分别为 0.36,1.17 Pa·s),水性环氧树脂的加入可以明显提高乳化沥青的黏度,有效改善乳化沥青与集料的黏结力,增强对集料的握裹力,从而显著提升微表处的抗水损坏能力。

(2)随着油石比的增大,水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的磨耗值逐渐减小,即微表处的抗水损坏能力越来越强。同时,在试验过程中发现,随着油石比的增大,微表处未出现单独的分散、剥离的松散颗粒,没有分块聚团以及用手触碰就会有颗粒剥落的现象,黏结效果很好,整体性较好。

表 11 不同油石比下微表处的 6 d WTAT 试验结果

Tab. 11 6 d WTAT test results of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

油石比/%	6.5	7.0	技术标准 ^[22]
磨耗值/(g·m ⁻²)	745	683	<800

2.2.2.2 抗滑性能

为了测试水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的抗滑性能,本文在室内模拟现场摊铺,并采用《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008)中的摆式仪测定其抗滑性能。

在制作水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的抗滑测试试件时,采用 4 cm AC-13+1 cm 微表处的结构。首先在 30 cm(长)×30 cm(宽)×5 cm(高)车辙试件的试模中垫入 1 cm 的钢板,成型 AC-13 车辙试件,在室内静置 48 h。然后将成型 AC-13 车辙试件的模具拆卸,拿出试件和钢板,并将成型的 4 cm AC-13 车辙试件重新放入试模中。最后,将水性环氧树脂改性乳化沥青微表处铺筑在 4 cm AC-13 试件上,形成 4 cm AC-13+1 cm 微表处试件,并将试件在(60±2) ℃烘箱中养生 16 h 以上,取出放至室温后进行抗滑性能试验,抗滑试件见图 2。利用摆式仪测试微表处的摩擦因数,每种油石比微表处测定 5 次,试验结果见表 12。从表 12 可以看出:

(1)微表处标准摆值相对于一般路面设计交工时应满足不小于 70 BPN 的要求,2 种油石比下的微表处摆值均满足规范要求,并且高出 10%~14%,这是由于采用水性环氧树脂改性乳化沥青作为微表处胶结料,其破乳时随着水分的蒸发,微表处表面变得比较粗糙,同时,水性环氧树脂的加入能够有效提

高沥青与集料的黏结性,使得细集料不易松散、剥落,增加了其对轮胎的摩擦力。

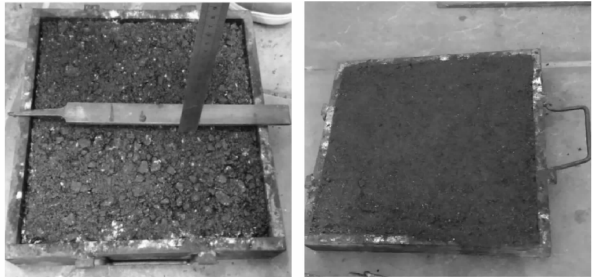


图 2 4 cm AC-13 和 4 cm AC-13+1 cm 微表处的试件

Fig. 2 4 cm AC-13 and 4 cm AC-13+1 cm micro-surfacing test samples

表 12 不同油石比下微表处的摩擦因数

Tab. 12 BPN of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

油石比/%	温度/℃	摆值/BPN	标准差/BPN	技术标准 ^[22] /BPN
6.5	26	80	1.79	>70
7.0	26	78	1.26	

(2)随油石比的升高,水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的摆值降低,但是变化幅度不大。通过试件可观测到微表处表面十分粗糙,当将水性环氧树脂改性乳化沥青微表处用于路面养护时,可以为行车提供较好的摩擦力,增加行车的安全性。

2.2.2.3 防水性能

按照制作抗滑试件的方法制作防水性能试件,并进行渗水系数测定,在试验过程中发现,直接进行摊铺的微表处,渗水系数可达 100 ml/min,这与微表处防水作用不符。调整试件的养生方法,即在试件养生的过程中,对试件进行轻碾压实,模拟微表处通车后的行车压实,共碾压 5 次。将碾压后的试件进行渗水试验,每种油石比试件做 3 组平行试验,试验结果见下页表 13。从表 13 可以看出:

(1)当微表处未进行碾压,借助摊铺及重力进行自密实时,微表处防水效果并不好,渗水系数过大。微表处在拌和过程中,加入的水及乳化沥青中含有的水容易导致微表处中的水分过多,当水分全部蒸发时,微表处的内部空隙率可超过 10%,甚至更大,导致渗水效果明显,防水效果不好;由于微表处在拌和搅拌作用下,引起水性环氧树脂改性乳化沥青起泡,气泡的介入导致混合料的内空隙率增大,在水分蒸发的过程中,环氧树脂开始固化,形成初期强度,微表处很难在固化时依靠自身重力和流动性进行自密实。

表 13 不同油石比下微表处的渗水系数

Tab. 13 Seepage test results of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

油石比/%	渗水系数/(ml·min ⁻¹)	
	未碾压	碾压后
6.5	113±2.45	0
7.0	102±1.36	0

(2)在出现渗水系数过大后,对试件模拟行车压实,进行轻型碾压。碾压后发现无论油石比为6.5%还是7.0%,其渗水系数均为0,防水效果较好。因此,建议在微表处施工过程中采用轻型碾压,或者及时开放交通,通过控制行车速度来进行微表处的初期碾压,以达到更好的密实度和防水效果。

2.2.2.4 抗车辙性能

微表处的两大作用分别为车辙填补和罩面。本文通过室内设计微表处填补车辙试验和罩面车辙试验,分别研究水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的抗车辙性能。

(1)轮辙变形试验

轮辙变形试验主要用于评价微表处抗车辙能力,主要指标为宽度变形率和车辙深度率,宽度变形率和车辙深度率越大,说明微表处抗车辙性能越差,反之亦然。每种油石比微表处做3组平行试验,轮辙变形试件见图3,试验结果见表14。

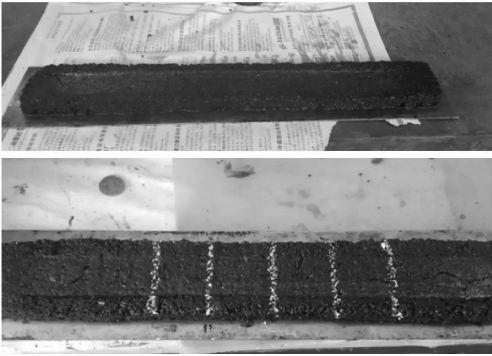


图 3 轮辙变形试件

Fig. 3 Stability and resistance to compaction test samples

表 14 不同油石比下微表处的宽度变形率和车辙深度率

Tab. 14 Width deformation ratios and rutting depth ratios of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

油石比/%	宽度变化 平均值/mm	宽度变形 率/%	厚度变化 平均值/mm	车辙深度 率/%
6.5	1.84±0.10	3.7	0.9±0.08	9.0
7.0	1.94±0.05	3.9	1.2±0.09	12.0
技术标准 ^[22]			5.0	2.0

从表14可以看出:2种油石比微表处的宽度变形率和车辙深度率均随油石比的增加呈上升趋势,

但均符合规范要求,说明油石比6.5%和7.0%微表处的抗车辙性能满足要求,可用于车辙填补。

(2)车辙填补试验

在室内模拟微表处车辙填补试验,并对车辙填补后的微表处进行抗车辙能力分析。首先,成型30 cm(长)×30 cm(宽)×5 cm(高)AC-13车辙试件并进行车辙试验,车辙深度约5 mm。其次,将约5 mm车辙深度的AC-13试件表面用水清洗干净、晾干。最后,将水性环氧树脂改性乳化沥青微表处摊铺在其上,将试件放入60℃烘箱养生16 h以上,取出放至室温等待试验,见图4。将填补车辙后的试件进行车辙试验,每种油石比微表处做3组平行试验,试验结果见表15。

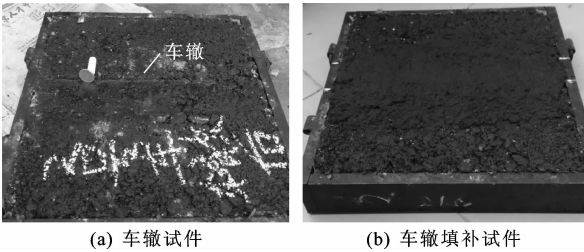


图 4 车辙及车辙填补后试件

Fig. 4 Rutting and filling rutting test samples

表 15 不同油石比下微表处的车辙填补试验结果

Tab. 15 Filling rutting test results of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios

参数	油石比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	技术标准 ^[24] / (次·mm ⁻¹)
AC-13 试件	4.5	1 431.0±74.3	>800
填补车辙后的微表处	6.5	1 409.0±51.4	
	7.0	1 342.0±99.6	

由图4可以看出:车辙填补后,恢复了试件的平整度,当用于实际路面时可以满足车辆行驶的平稳要求。因此水性环氧树脂改性乳化沥青微表处不宜用于结构性车辙填补,可以用于压密性车辙填补,以恢复路面平整度。

从表15可知:车辙填补后的微表处动稳定度均满足规范的要求^[24],但车辙填补后的微表处试件动稳定度相对于AC-13试件并没有提高,这是由于本文模拟的车辙为路面出现的早期压密性车辙,采用微表处对此类车辙进行填补时只能延缓而不能彻底遏止其发展。

(3)罩面车辙试验

制作水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的罩面车辙试件时,设计罩面微表处厚度为1 cm,即采用4 cm AC-13+1 cm微表处的结构。首先在30 cm

(长)×30 cm(宽)×5 cm(高)车辙试件的试模中垫入 1 cm 的钢板,成型 AC-13 车辙试件,在室内静置 48 h。然后将成型 AC-13 车辙试件的模具拆卸,拿出试件和钢板,并将成型的 4 cm AC-13 车辙试件重新放入试模中。最后将水性环氧树脂改性乳化沥青微表处铺筑在 4 cm AC-13 试件上,形成 4 cm AC-13+1 cm 微表处的试件,将试件在(60±2)℃烘箱养生 16 h 以上,取出放至室温进行车辙试验,每种混合料做 3 组平行试验,结果见表 16。

表 16 不同油石比下微表处的罩面车辙试验结果

Tab. 16 Recovering rutting test results of micro-surfacing with different binder-aggregate ratios			
参数	油石比/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	技术标准 ^[24] / (次·mm ⁻¹)
AC-13 试件	4.5	890.0±57.1	>800
4 cm AC-13+	6.5	1 375.0±73.5	
1 cm 微表处	7.0	1 191.0±58.0	

从表 16 可知:4 cm AC-13+1 cm 水性环氧树脂改性乳化沥青微表处的动稳定度比传统的 AC-13 混合料的动稳定度高 30%以上,说明利用水性环氧树脂改性乳化沥青微表处罩面后能显著提高路面的高温抗变形能力,这主要是环氧树脂固化后形成的网络交联结构在一定程度上吸附了沥青,提高了微表处的高温稳定性;相对于油石比为 6.5%的微表处,油石比为 7.0%的微表处动稳定度下降了 10%左右,说明油石比的增加会降低罩面车辙后微表处的高温抗变形能力。

3 结 语

(1)通过三因素三水平正交试验确定的水性环氧树脂改性乳化沥青的最佳配比为油水比为 65 : 35,改性剂掺量为 4.0%,乳化剂掺量为 1.4%。

(2)通过摆值、渗水、轮辙变形、车辙填补及罩面车辙试验发现,水性环氧树脂改性乳化沥青微表处具有良好的防滑性能、防水效果以及抗车辙性能,但施工后应控制好通车时间,及时利用行车进行碾压密实或采用轻型压路机进行压实,才可以达到不透水的效果。同时,水性环氧树脂改性乳化沥青微表处可用于路面早期压密性车辙填补,不宜作为结构性车辙填补。

(3)油石比为 7.0%的微表处抗水损坏能力和防水性能均优于油石比为 6.5%的微表处,而罩面车辙后微表处的高温抗变形能力则刚好相反,说明在雨水较多的地区应选择 7.0%油石比的微表处,

而在温度较高地区应选择 6.5%油石比的微表处。
(4)本文中的水性环氧树脂改性乳化沥青低温柔韧性较低,后续研究中可通过加入增韧剂(如马来酸二辛酯)来提高其低温柔韧性,也可在微表处中添加纤维来进一步提高其低温性能。

参考文献:
References:

[1] 徐 剑,黄颂昌. 沥青路面预防性养护理念与技术 [M]. 北京:人民交通出版社,2011.
XU Jian, HUANG Song-chang. Asphalt pavement preventive maintenance theories and practices [M]. Beijing:China Communications Press,2011.

[2] 陈筑苏. 微表处技术和预防性养护在公路养护工程中的应用[J]. 公路,2012(6):260-262.
CHEN Zhu-su. Application of micro-surfacing technology and preventive maintenance on highway maintenance project[J]. Highway,2012(6):260-262.

[3] 贺 华. 改性乳化沥青及微表处性能研究[D]. 西安:长安大学,2006.
HE Hua. Research on performance of modified emulsified asphalt and micro-surfacing [D]. Xi'an: Chang'an University,2006.

[4] 黄颂昌,徐 剑,秦永春. 改性乳化沥青与微表处技术 [M]. 北京:人民交通出版社,2010.
HUANG Song-chang, XU Jian, QIN Yong-chun. Modified emulsified asphalt and micro-surfacing technology [M]. Beijing:China communications Press,2010.

[5] 孙晓立,张肖宁. 高性能微表处的室内试验研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(6):867-870.
SUN Xiao-li, ZHANG Xiao-ning. Experimental study on high performance micro-surfacing [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40 (6): 867-870.

[6] 王宁勇,汪俊波. 微表处车辙填补技术和微表处罩面技术[J]. 华东公路,2009(4):53-56.
WANG Ning-yong, WANG Jun-bo. Micro-surfacing rutting filling technology and micro-surfacing cover technology[J]. East China Highway,2009(4):53-56.

[7] KRUMMENAUER K, ANDRADE J J D O. Incorporation of chromium-tanned leather residue to asphalt micro-surface layer[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(1):574-581.

[8] SON H J, KIM Y J, BAEK J E, et al. Field performance evaluation of micro-surfacing method and polymer slurry seal method used in national highway[J]. International Journal of Highway Engineering,2015,17(1):17-24.

- [9] SON H J, KIM Y J, LIM J K, et al. Influences of curing time on polymer-modified emulsion used for slurry seal and micro-surfacing mixes [C]//ASCE. International Conference on Sustainable Civil Infrastructure. Reston: ASCE, 2014: 35-42.
- [10] WU Zhao-yang. Research on fiber micro-surfacing mixture design and pavement performance in interchange's connections[C]//MATEC. International Conference on Energy, Materials and Manufacturing Engineering. Les Ulis: EDP Sciences, 2015: 1-6.
- [11] ZHAO Mei-ling, ZHAO Zhi-jie. Study on noise reduction mechanism and surface performance of crumb rubber micro-surfacing material[J]. Key Engineering Materials, 2014, 599: 257-260.
- [12] 钟建超, 何志勇, 姚爱玲, 等. 低噪微表处混合料矿料级配优化设计[J]. 公路交通科技, 2014, 31(6): 41-46.
ZHONG Jian-chao, HE Zhi-yong, YAO Ai-ling, et al. Optimization design of mineral aggregate gradation for low noise micro-surfacing mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(6): 41-46.
- [13] 王磊, 吕璞, 郝培文. 微表处混合料路用性能影响因素[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(2): 29-33.
WANG Lei, LU Pu, HAO Pei-wen. Factors affecting pavement performance of micro-surfacing mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(2): 29-33.
- [14] 黄伟, 高萍. 聚丙烯纤维微表处路用性能室内试验研究[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 256-261.
HUANG Wei, GAO Ping. Experimental study on pavement performance of polypropylene fiber micro-surfacing[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(1): 256-261.
- [15] 黄志军, 刘伟铭, 胡学斌. 一种用于微表处的乳化 SBS 改性沥青的试验研究[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 302-306.
HUANG Zhi-jun, LIU Wei-ming, HU Xue-bin. Experimental study on SBS emulsified modified asphalt micro-surfacing [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 302-306.
- [16] 孙晓立, 张肖宁, 蔡旭. 基于加速加载试验的微表处长期路用性能[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 691-695.
SUN Xiao-li, ZHANG Xiao-ning, CAI Xu. Accelerated test-based study of long-term pavement performance of micro-surfacing[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(5): 691-695.
- [17] 蔡旭, 王端宜, 张吉庆, 等. 微表处混合料室内加速加载试验[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(5): 791-797.
CAI Xu, WANG Duan-yi, ZHANG Ji-qing, et al. Indoor accelerated loading test on micro-surfacing coating[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(5): 791-797.
- [18] 黎侃, 李新伟, 王端宜. 聚丙烯单丝纤维微表处路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 17-22.
LI Kan, LI Xin-wei, WANG Duan-yi. Study on road performances of micro-surfacing mixed with polypropylene filament fiber [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8): 17-22.
- [19] 张庆, 郝培文, 白正宇. 水性环氧树脂改性微表处性能影响及评价研究[J]. 公路, 2015(6): 250-252.
ZHANG Qing, HAO Pei-wen, BAI Zheng-yu. Study on properties of waterborne epoxy resin modified micro-surfacing[J]. Highway, 2015(6): 250-252.
- [20] 夏慧芸, 张瑞, 袁腾, 等. 微表处高性能 SBS 改性乳化沥青制备工艺研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(1): 246-247, 250.
XIA Hui-yun, ZHANG Rui, YUAN Teng, et al. Study on preparation technology of SBS modified emulsified asphalt with high performance used in micro-surfacing [J]. New Chemical Materials, 2017, 45(1): 246-247, 250.
- [21] JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程[S].
JTG E42—2005, The methods of aggregate for highway engineering[S].
- [22] 交通运输部科学研究院. 微表处和稀浆封层技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
China Academy of Transportation Sciences. Technical guide lines for micro-surfacing and slurry seal[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [23] GB 175—2007, 通用硅酸盐水泥[S].
GB 175—2007, Common Portland cement[S].
- [24] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].
JTG F40—2004, Technical specifications for construction of highway asphalt pavements[S].